第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

昆仑山北坡"6·14"极端暴雨过程的中尺度对流系统特征分析

李晓萌[1,2,3,4]， 杨莲梅[1,2,3,4]， 李建刚[1,2,3,4]， 刘 晶[1,2,3,4]

（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 新疆空中云水资源开发利用创新研究院，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 新疆云降水物理与云水资源开发实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；4. 西天山云降水物理野外科学观测试验基地，新疆 新源 844900）

摘 要：在全球变暖的背景下，昆仑山北坡极端暴雨频发且影响巨大，由于对其的观测和研究相对匮乏，使得该区域暴雨监测和预报难度大。理解其发生机理和关键影响系统是提高其监测预报的有效途径，对该区域防灾减灾意义重大。利用高时空分辨率的气象观测资料、GPS/Met大气可降水量（PWV）资料、风云卫星资料（FY-2H）和ERA5再分析资料，对2021年6月14—17日昆仑山北坡一次极端暴雨过程进行大尺度环流背景场和中尺度对流系统特征分析。结果表明：（1）此次暴雨过程，暴雨站数多、累积降水量大、局地性强并且极端性强，在和田地区出现3个极端暴雨中心，分别发生了短时强降水和连续性降水。其中短时强降水过程持续时间短，最大小时雨强达29.4 mm；连续性降水持续时间达3 d，小时雨强小于5 mm。本次极端暴雨发生的有利环流背景是双体型南亚高压在对流层高层维持，中亚低涡形成发展。在高低空急流共同作用下，高层强辐散、低层辐合促进大气垂直运动发展，500 hPa偏南气流、700 hPa切变线以及850 hPa偏东气流相互配合为暴雨提供有利动力配置。（2）对流层中层以西南路径和西南+南方路径水汽输送为主，低层主要以低空偏东急流携带水汽输送为主，中低层水汽输送路径形成耦合，促进本次极端暴雨的发展加强。极端暴雨发生前持续的水汽输送和强的水汽通量辐合中心，使得暴雨区大气可降水量（PWV）在降水前出现显著增湿聚集过程，PWV达30 mm。（3）列车效应型+合并加强型中尺度对流云团不断在暴雨站点上空生成发展并移过，是触发短时强降水的直接影响系统，站点位于对流云团黑体亮温（TBB）梯度最大处。中-β和中-α尺度对流云团发展维持以及涡旋状中尺度对流云带的持续覆盖，是导致暴雨站点发生连续性降水的关键系统。

关 键 词：极端暴雨；中亚低涡；水汽输送；中尺度对流系统；昆仑山北坡

文章编号：1000－6060（2024）10－1700－13（1700～1712）

昆仑山北邻南疆盆地，南连藏北高原，西接帕米尔高原，山脉北部平原区年平均降水量多为25~50 mm[1]。研究指出，在全球变暖的背景下，新疆地区强降水频次和强度均呈增加趋势，尤其是局地暴雨[2-4]。最近的研究发现，南疆地区降水量也增多，暴雨发生频次增加[5]。由于新疆生态环境脆弱，暴雨往往会造成洪涝、泥石流和山体滑坡等灾害，对生产建设和人民生命财产安全造成严重威胁。此外，暴雨突发性强，预报难度大，为防灾减灾工作带来困难。因此，理解新疆地区暴雨过程的发生发展机理十分关键。

前人研究统计了新疆降水的时空分布特征，分

收稿日期：2023-08-10； **修订日期**：2023-10-04

基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目（2022D01D86）；"天山英才"培养计划项目（2022TSYCLJ0003）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（IDM2022001）；中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所科技发展基金（KJFZ202301）资助

作者简介：李晓萌（1995-），女，硕士研究生，研究实习员，主要从事天气气候和云降水物理研究. E-mail: lixm@idm.cn

通讯作者：杨莲梅（1969-），女，博士，研究员，主要从事天气气候和云降水物理研究. E-mail: yanglm@idm.cn

析了利于暴雨发生的大尺度环流背景、水汽输送特征、降水动力机理、降水系统结构和数值模拟[6-11]等方面,取得了大量有意义的结果。就暴雨发生的大尺度环流背景和天气系统方面,诸多研究指出,南疆暴雨大多数发生双体型南亚高压的大尺度环流背景下[12-13]。杨涛等[14]研究结果表明,中亚低槽(涡)、西西伯利亚低槽(涡)、西北低空急流是影响新疆短时强降水的主要系统。张俊兰等[15]对昆仑山北坡短时强降水天气分型,得到中亚低涡(槽)型、西风带短波型、高原低涡(槽)型3类,其中中亚低涡(槽)型最多。高低空急流的配合可以为暴雨的发生提供有利的动力条件,胡素琴等[13]研究发现,低空急流不仅是南疆暴雨发生地的水汽通道,还与地形形成强烈辐合,是触发暴雨发生和水汽集中的关键。就暴雨水汽源地及输送路径方面,庄晓翠等[16]研究结果指出,南疆西部暴雨过程水汽主要来自西南亚、中亚、地中海和黑海及其附近、大西洋及其沿岸。黄艳等[17]研究发现,中亚低涡携带水汽东移南下,低纬孟加拉湾、阿拉伯海携带水汽西北上及贝加尔湖偏东水汽爬升西送,3支水汽在南疆西部辐合,触发区域性暴雨。

中尺度对流系统(Mesoscale convective system,MCS)是夏季造成暴雨灾害性天气的重要天气系统[18]。曾勇等[19]研究指出,中尺度对流云团生成后在引导气流的作用下不断向北移动发展,是造成新疆西部极端暴雨的直接系统。庄晓翠等[20]研究发现,影响新疆短时强降水的对流风暴主要是合并加强型、列车效应型和本地发展型,其中合并发展型最多、列车效应型最少,并且在地形影响下主要发生在天山北坡。局地性极端天气灾害往往是由于前期能量积蓄和地形等原因导致分配不均进而引发次级环流,配合天气尺度环流系统共同造成的[21]。大尺度地形陡变区是对陆-气相互作用影响最重要的复杂条件之一,其动力热力作用不仅会产生较强的中尺度环流,影响水汽输送和天气过程形成,还会引起大气边界层内部的非均匀动力扰动,影响天气系统发展[22]。陆-气相互作用通过物质、动量和能量交换影响对流活动的发生发展[23]。以上这些研究结果有助于进一步加深对新疆地区特殊地形条件下极端暴雨发生发展机理的理解。然而,相对于中国中东部地区,针对新疆地区尤其是昆仑山北坡的暴雨研究相对较少且还不够深入,并且由于新疆地形特殊,疆内南北地区降水差异大,因此有必要针对多个典型个例进行深入的分析。

2021年6月14—17日,昆仑山北坡出现极端暴雨过程,对当地农牧业生产、交通运输、城市运行等造成较大影响。此次暴雨过程,累积降水量大、暴雨站数多、局地性强并且极端性强。那么触发此次极端暴雨过程的大尺度环流背景场和关键中尺度系统是什么?暴雨过程水汽输送特征及造成本次暴雨过程的中尺度对流系统特征是怎样的?为了解决以上问题,本文使用多源数据集,就此次昆仑山北坡极端暴雨过程进行分析,希望能对昆仑山北坡暴雨的监测预警以及昆仑山北坡的防灾减灾工作提供一定理论依据。

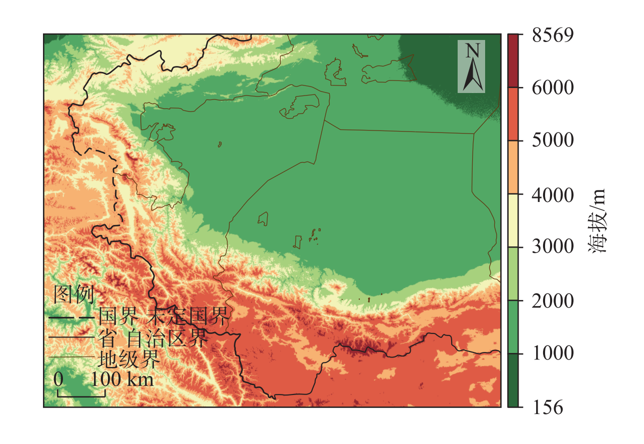
1　资料和方法

1.1　资料

本文使用区域自动站逐1 h降水量数据进行降水实况分析。大尺度环流背景、中尺度系统及水汽输送等特征分析使用ERA5逐1 h再分析数据,水平分辨率为0.25°×0.25°。还使用到新疆和田地区3个暴雨站点的GPS/Met逐1 h大气可降水量(Precipitable water vapor,PWV)资料,在刘晶等[24]的研究中证实了该数据在和田地区使用的可靠性。中尺度对流系统的分析使用风云卫星逐30 min黑体亮温(Black body temperature,TBB)(FY-2H),水平分辨率为0.1°×0.1°。

1.2　方法

图1给出了昆仑山北坡地形图,可以看到地形



注:基于新疆维吾尔自治区自然资源厅审图号为新S(2023)063号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1　南疆地形图

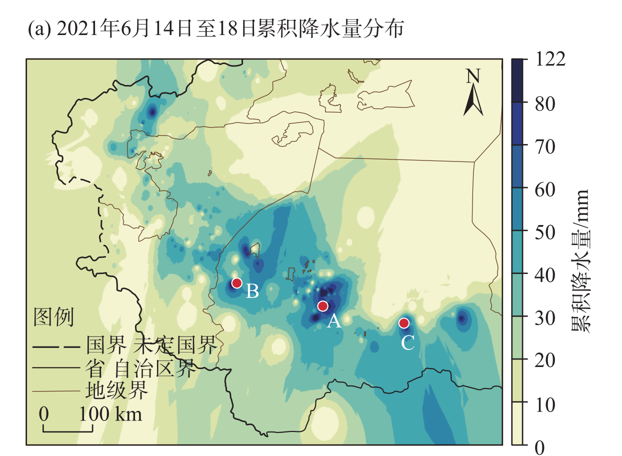
Fig. 1　Topographic map of southern Xinjiang

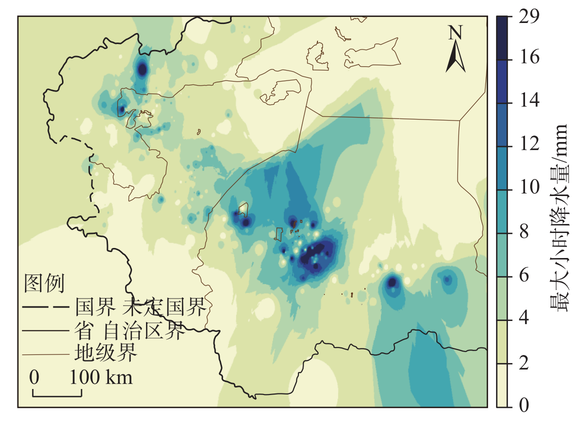
呈明显的向东开口的喇叭状,西北侧为西天山、西南侧为帕米尔高原、南侧为昆仑山,其东侧为塔克拉玛干沙漠,部分地区海拔高度超过5 km以上。由于南疆特殊的地形分布,并且远离海洋,形成了典型的干旱半干旱气候。因此,在新疆地区特殊的气候背景下,国家降水量级标准并不适合该区域。新疆气象工作者根据新疆气候特点和业务需求给出了适合新疆的降水量级标准,规定了新疆地区24 h降水量6.0 mm以上为中雨,12.0 mm以上为大雨,24.0 mm以上为暴雨[25]。

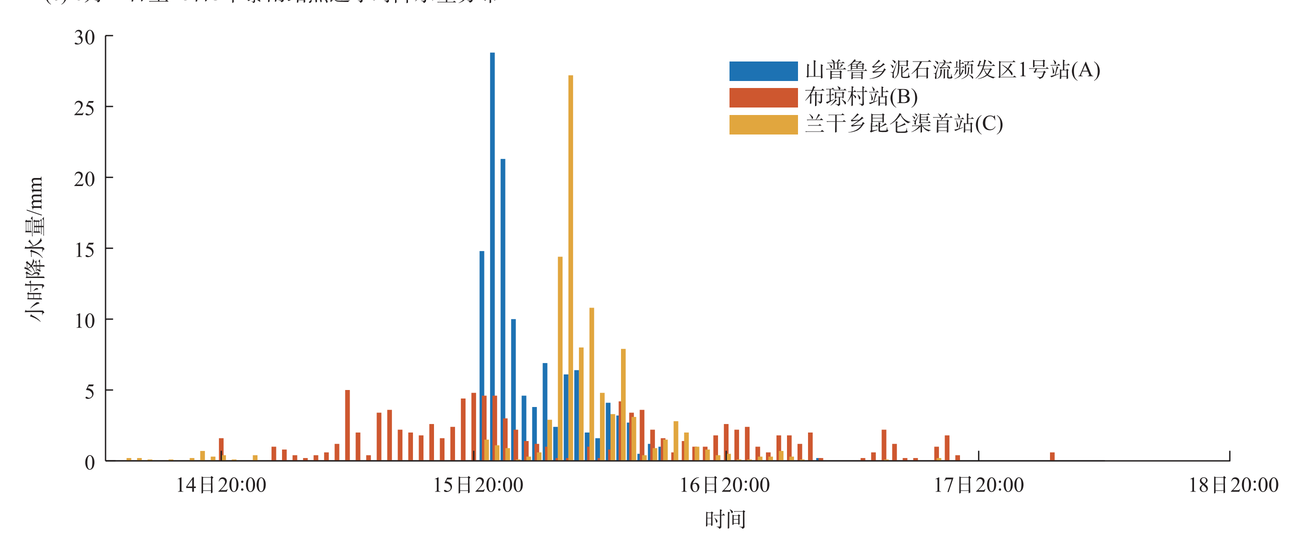
2 结果与分析

2.1 天气实况及其极端性

2021年6月14日20:00至17日08:00,昆仑山北坡南疆喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州(克州)、和田地区出现强降雨过程。最大降雨中心为和田地区洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站,累积降水量121.6 mm(图2a),布琼村站(107.8 mm)和兰干乡昆仑渠首站(102.1 mm)次之。共有54站次出现短时强降水(≥10.0 mm·h^{-1}),最大小时雨强29.4 mm(图2b)。进一步统计累积降水量最多的3个站点小时降水量时间分布发现(图2c),洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站强降水主要集中发生在15日20:00至16日13:00;兰干乡昆仑渠首站强降水主要发生时段为15日20:00至16日20:00;布琼村站与前2个站点明显不同,降水强度显著低于前2个站点但持续时间长,降水过程发生在14日20:00持续至17日20:00。和田地区洛浦县(74.1 mm)、墨玉县(59.6 mm)、和田市(56.0 mm)打破日降水量历史极值并超过其年平均







注:图c中的A、B、C与图a中对应。

图2 降水实况分布

Fig. 2 Actual precipitation distribution

降水量，其中洛浦县16日降水量为该站年平均降水量的1.7倍。此次暴雨过程，累积降水量大、暴雨站数多、局地性强并且极端性强，对当地人民生产生活造成较大影响。

2.2 大尺度环流背景

图3给出了本次降水过程的大尺度环流背景和中尺度系统。结果显示，2021年6月13—14日，100 hPa南亚高压由带状分布转为双体型，中心分别位于伊朗高原和青藏高原（图略）。15—16日，南亚高压继续发展加强，并且在高压中心之间形成中纬度副热带长波槽，长波槽前西南急流建立后加强维持，暴雨区位于高空急流入口区右侧强辐散区，为暴雨的发生提供动力条件（图3a），这与前人研究结果一致[19,25]。6月13—14日，500 hPa伊朗副热带高压发展加强并与东欧高压脊叠加，脊前中亚低槽不断发展南伸（图略）。15—16日，随着西北太平洋副热带高压西伸北抬，伊朗高压持续加强发展，中亚低槽由巴尔喀什湖南伸至南疆西部，造成南疆西部出现降水。在伊朗高压和西太副高的左右夹击下，16日06:00中亚低槽发展为中亚低涡系统，暴雨区位于中亚低涡东部，中亚低涡前偏南气流为暴雨区持续输送暖湿水汽（图3b）。700 hPa巴尔喀什湖与咸海之间，在昆仑山北坡西部存在明显的风场切变线（图略），配合850 hPa强的偏东气流（图3c），利于水汽在昆仑山北坡地区聚集，为暴雨提供有利水汽条件。综上，此次昆仑山北坡暴雨过程发生在“两脊一槽”的环流背景下，高空南亚高压呈双体型，中亚低涡生成发展，暴雨区位于200 hPa西南急流入口区右侧提供了有利动力条件，500 hPa偏南气流、700 hPa切变线以及850 hPa偏东气流利于暴雨区的水汽输送和聚集，促使此次昆仑山北坡极端暴雨天气的发生（图3d）。

2.3 水汽输送特征

暴雨的发生离不开充足的水汽和持续的水汽输送，这里我们重点分析了累积降水量最多的3个站点。图4给出了洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站、布琼村站和兰干乡昆仑渠首站3个站点暴雨发生时刻500 hPa和850 hPa水汽通量及风场空间分布。从图4a~b可以看出，在2021年6月15日08:00，500 hPa中纬度低槽前的西南气流与副热带高压西

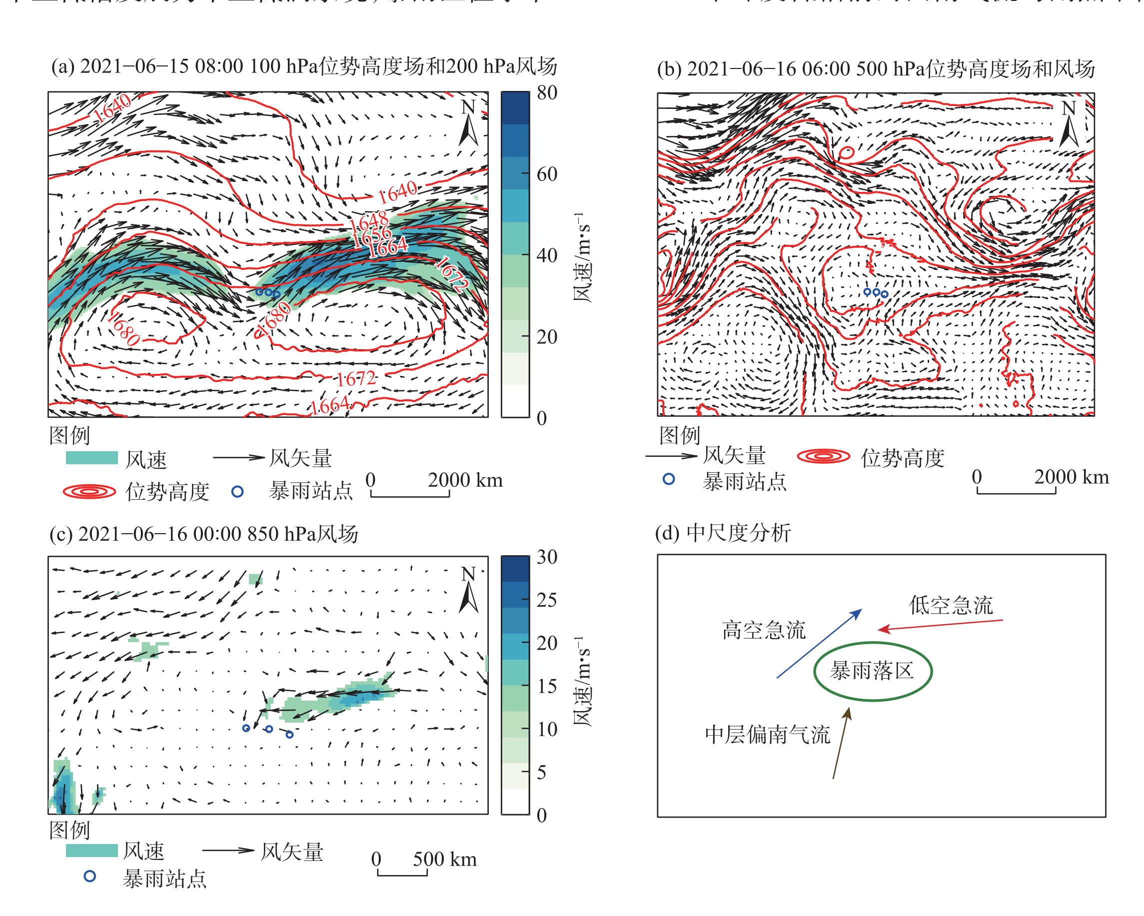


图3 大尺度环流背景和中尺度系统

Fig. 3 Large-scale circulation background and mesoscale systems

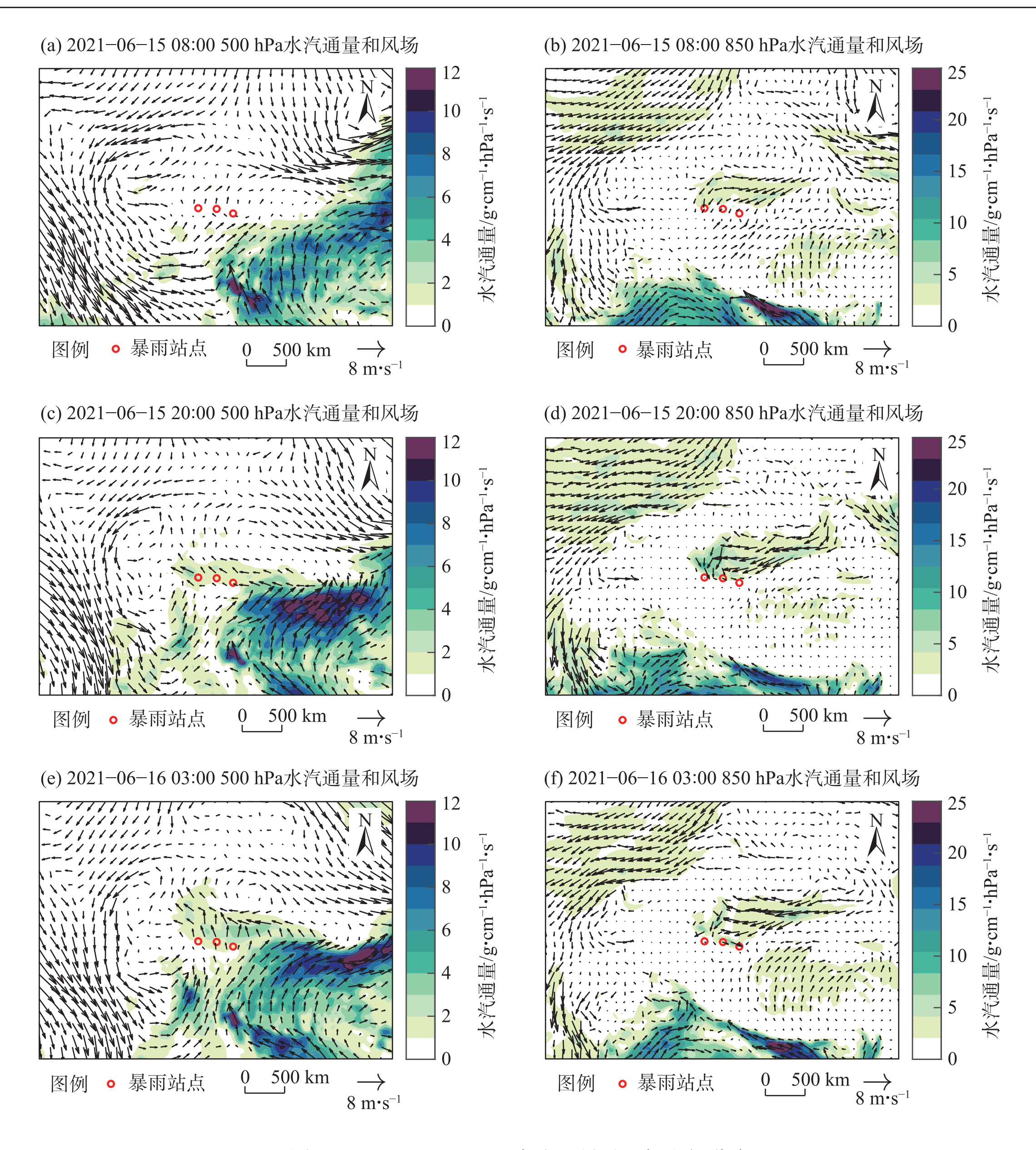


图4 500 hPa和850 hPa水汽通量及风场空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water vapour fluxes and wind fields at 500 hPa and 850 hPa

侧偏南的气流在青藏高原西南侧汇聚，最强水汽通量为12 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$，水汽以西南路径输送至暴雨区；850 hPa暴雨区北侧存在一支强的低空偏东急流（LLEJ），携带水汽以偏东路径输送至暴雨区，最强水汽通量为5 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$。这与刘晶等[24]的研究结果比较一致，但本次暴雨过程中水汽通量强度更大。这样的高低空水汽输送路径使得暴雨区上空存在强烈的水汽耦合，利于暴雨的发生增强。6月15日20:00，500 hPa中纬度低槽南伸至30°N附近，槽前西南气流携带水汽以西南路径输送至暴雨区，最强水汽通量为6 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$；副热带高压西伸北抬，使得水汽在高原北侧汇聚，高原水汽不断北上、西折输入至暴雨区，最强水汽通量超过12 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$（图4c），该水汽输送路径与张俊兰等[26]研究中的“西南+南方”路径比较相似，但水汽通量强度较该研究中个例更大。850 hPa暴雨区北侧低空偏东急流增强，携带水汽增多，持续以偏东路径向暴雨区输送水汽（图4d），为暴雨区提供充足的水汽供应。6月16日03:00，500 hPa中纬度低槽持续南压至25°N附近，副热带高压不断西伸北抬，槽前的西南气流携带水汽与副高西南侧的东南气流携带水汽在高原西侧汇聚，以西南路径输送至暴雨区，此路径下最强水汽通量为8 $g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$。而由于副高北抬，其北侧转向路径下的水汽输送至

暴雨区北侧，因此该时次暴雨区水汽主要来自西南路径输送（图4e）。850 hPa依然是低空偏东急流持续以偏东路径向暴雨区输送水汽（图4f），与500 hPa西南路径水汽输送形成耦合，持续为暴雨区供应水汽。对于暴雨的物理过程，除了要有较强的水汽输送外还需要有水汽辐合[27]。图5给出了3个暴雨站点水汽通量散度纬向垂直剖面分布。可以看到，在3个站点上空均存在水汽通量辐合，强度达-12×10^{-5} g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}。这是因为站点均位于昆仑山北坡，低空偏东急流输送水汽至暴雨区，受山脉地形阻挡形成强辐合，使得水汽聚集，为暴雨的发生发展提供有利水汽条件。

2.4　局地PWV变化特征

进一步利用和田站、皮山站和于田站GPS/Met

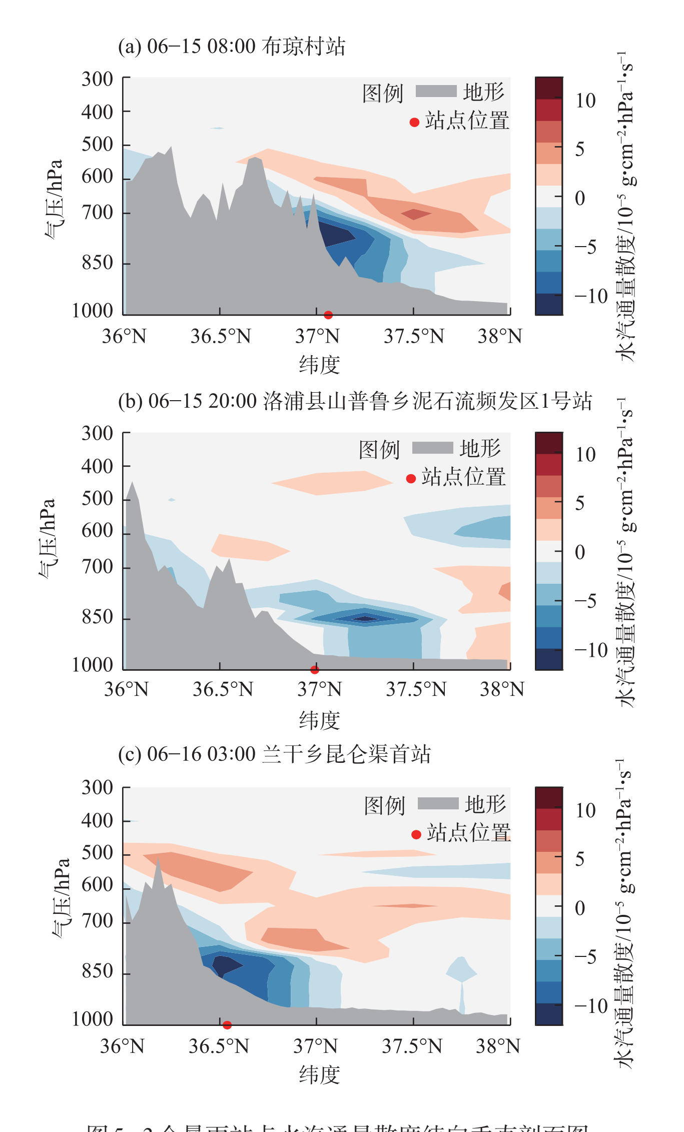


图5　3个暴雨站点水汽通量散度纬向垂直剖面图

Fig. 5　Latitudinal vertical profiles of water vapour flux dispersion at 3 heavy rainfall stations

水汽探测仪反演逐小时PWV资料，分析3个站点的GPS-PWV时间演变特征。由于这3个站点距离3个累积降水量最强的3个中心最近，因此我们使用其近似代表3个强降水中心的PWV特征，结果如图6所示。可以看到在大尺度水汽输送背景下，3个站点的PWV变化特征比较相似，都存在快速增湿的过程。针对2个发生短时强降水站点，我们从图6a和图6c中可以看到，在洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站强降水发生前，由于中亚低涡在巴尔喀什湖西南侧生成发展，低涡南侧中纬度槽南伸至30°N附近，同时副高西伸北抬，槽前西南气流携带水汽与副高西侧的偏南气流在青藏高原汇聚并输送至暴雨区（图4c~d），PWV呈现显著增湿，从16.75 mm增湿至26.38 mm，增幅为9.65 mm，并在16日00:00，达到最大值为30.03 mm。刘晶等[24]通过计算得到2017—2019年和田站PWV平均值为16.8 mm，本次过程的PWV峰值是气候态的1.8倍。16日00:00之后，PWV逐渐减小伴随降水过程结束。兰干乡昆仑渠首站由于上空中纬度槽前西南气流加强，将水汽持续以西南路径输送至该站点（图4e~f），使得PWV在强降水发生前显著增湿，由10.75 mm增至19.91 mm，增幅为9.16 mm，峰值是气候态的1.2倍。值得注意的是，虽然该站点的PWV明显低于其他2个站点，但在强降水事件发生前该站点的PWV在较短时间内出现较大增幅，意味着站点上空短时间内增湿明显，促进短时强降水的发生。针对发生连续性降水站点，图6b结果显示，在14日22:00至15日23:00，即布琼村站降水初期，仅由中纬度槽前西南气流输送水汽至该站点，随着中纬度槽不断南伸发展加强，槽前西南气流增强，与副高西侧偏南气流不断聚集水汽（图4a~d），PWV增湿明显，由14.96 mm增至峰值28.01 mm，增幅为13.05 mm，峰值是气候态的1.7倍。15日23:00之后，PWV缓慢减小但维持在20 mm以上，PWV变化与小时降水一致。那么，该站点上空持续存在中纬度槽前西南气流水汽输送，低空偏东急流水汽输送加之地形作用聚集水汽，这可能是该站点暴雨持续时间长的关键。

综合上述分析可以看出，3个累积降水量最大站点均具备较好的水汽条件，上空持续的水汽输送以及强的水汽通量辐合中心，使得站点的PWV在短时强降水前和连续性降水过程中出现显著增湿过

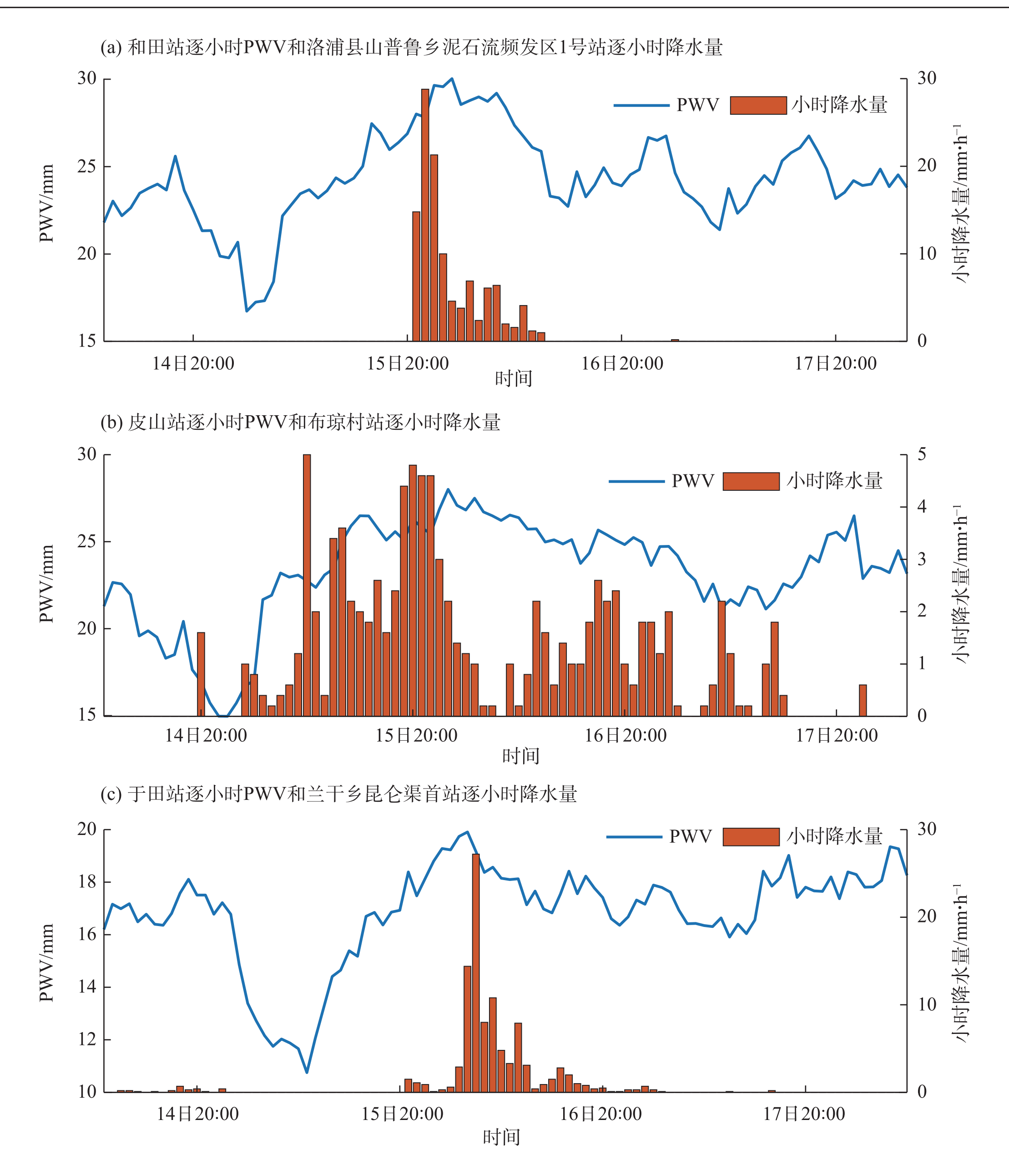


图6 3个暴雨站点逐小时大气可降水量(PWV)和逐小时降水量演变

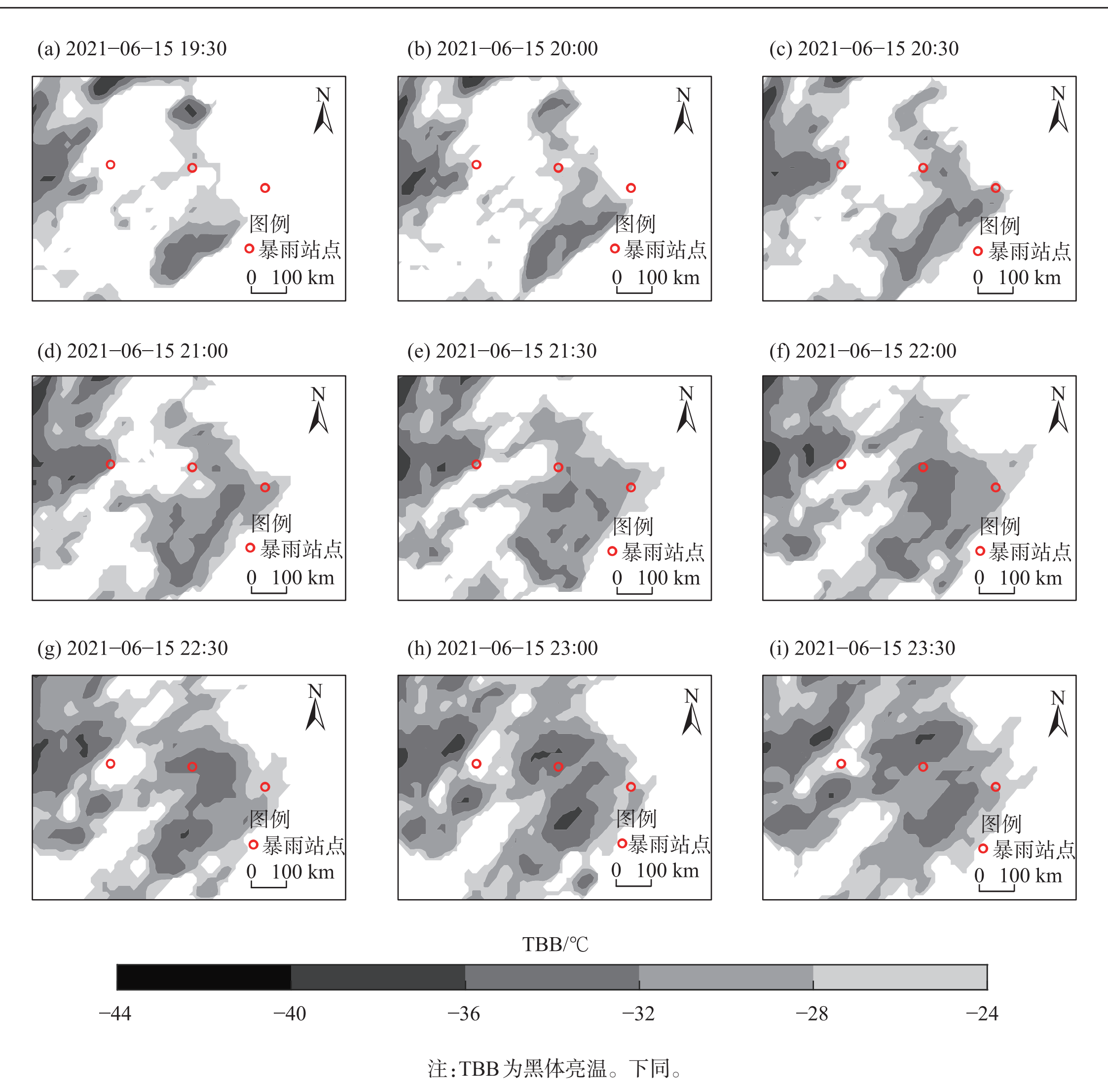
Fig. 6 Hourly atmospheric precipitable water vapor (PWV) and hourly precipitation evolution at 3 heavy rainfall stations

程。此外,布琼村站和兰干乡昆仑渠首站对流层中层(500 hPa)水汽输送路径主要以西南路径为主,洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站则以西南转向+南方路径为主。低层(850 hPa)主要以低空偏东急流携带水汽输送为主。

2.5 中尺度对流系统特征

静止卫星资料时空分辨率高,特别是TBB亮温资料不仅可以观测大范围云系分布,而且可以观测中小尺度云系的发生发展、成熟和消散演变的全过程。本文使用FY-2H逐30 min(0.1°×0.1°)TBB资料,针对累积降水量最大的3个站点(洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站、布琼村站和兰干乡昆仑渠首站),分析此次暴雨过程中中尺度对流云团的发生发展以及移动特征。根据新疆具体的地理环境,参考郑永光等[28]和Li等[29]文章中的标准进行中尺度对流云团判定。

图7给出了2021年6月15日19:30至6月15日23:30暴雨区附近逐30 min的TBB演变。可以看出,在"两高夹一低"的大尺度环流背景下(图3),15日19:30在洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站北侧有1个中-β尺度对流云团生成,中心强度为-40 ℃,南侧有中-α尺度对流云团,中心强度



注：TBB为黑体亮温。下同。

图7 2021年6月15日19:30至6月15日23:30 FY-2H卫星TBB逐30 min演变

Fig. 7 Evolution of the FY-2H satellite TBB over a 30-min period from 19:30 on June 15, 2021 to 23:30 on June 15, 2021

为-36 ℃(图7a)，云团位于中纬度低槽前的西南气流带中。随着西太副高不断西伸北抬，站点南侧云团也随着槽前西南引导气流不断发展北移，在20:30，中尺度对流云团分裂成3个中-β尺度对流云团，呈西北-东南向排列分布在洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站东侧，并在下一时次维持，中心强度为-40 ℃(图7c~d)。受其影响，洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站发生短时强降水，最大小时雨强达29.4 mm，站点位于TBB梯度最大处，这与前人研究一致[30]。随着3个中-β尺度对流云团消散，南侧的中-α尺度对流云团不断北移，尺度增大，在22:00移动至洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站上空并维持，中心强度为-36 ℃(图7f~g)。随后，中-α尺度对流云团分裂为2个中-β尺度对流云团，分别位于洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站南北两侧，中心强度为-40 ℃(图7h~i)。在旺盛的对流活动影响下，洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站持续发生强降水过程，强度大于20 mm·h^{-1}。综上，在6月15日19:30至6月15日23:30伴随着列车效应型和合并加强型中尺度对流云团的生成发展移过暴雨站点，正好对应了洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站上空短时强降水过程的发生发展。此外，我们注意到在15日19:30至22:00，布琼村站上空持续有对流云团覆盖在其西侧，且该站点位于云团TBB梯度最大处(图7a~f)。在15日23:00，其西南侧有2个中-β尺度对流云团生成，中心强度为-40 ℃，呈东北-西南向排列分布在布琼村站上空(图7h~i)，是影响该站点持续降水过程的关键系统。

图8给出了2021年6月16日00:00至6月16日04:00 TBB逐30 min演变。可以看出，在16日00:00，布琼村站上空存在由前一时次对流云团合并发展的呈东北-西南向分布的中尺度对流云带，对流云

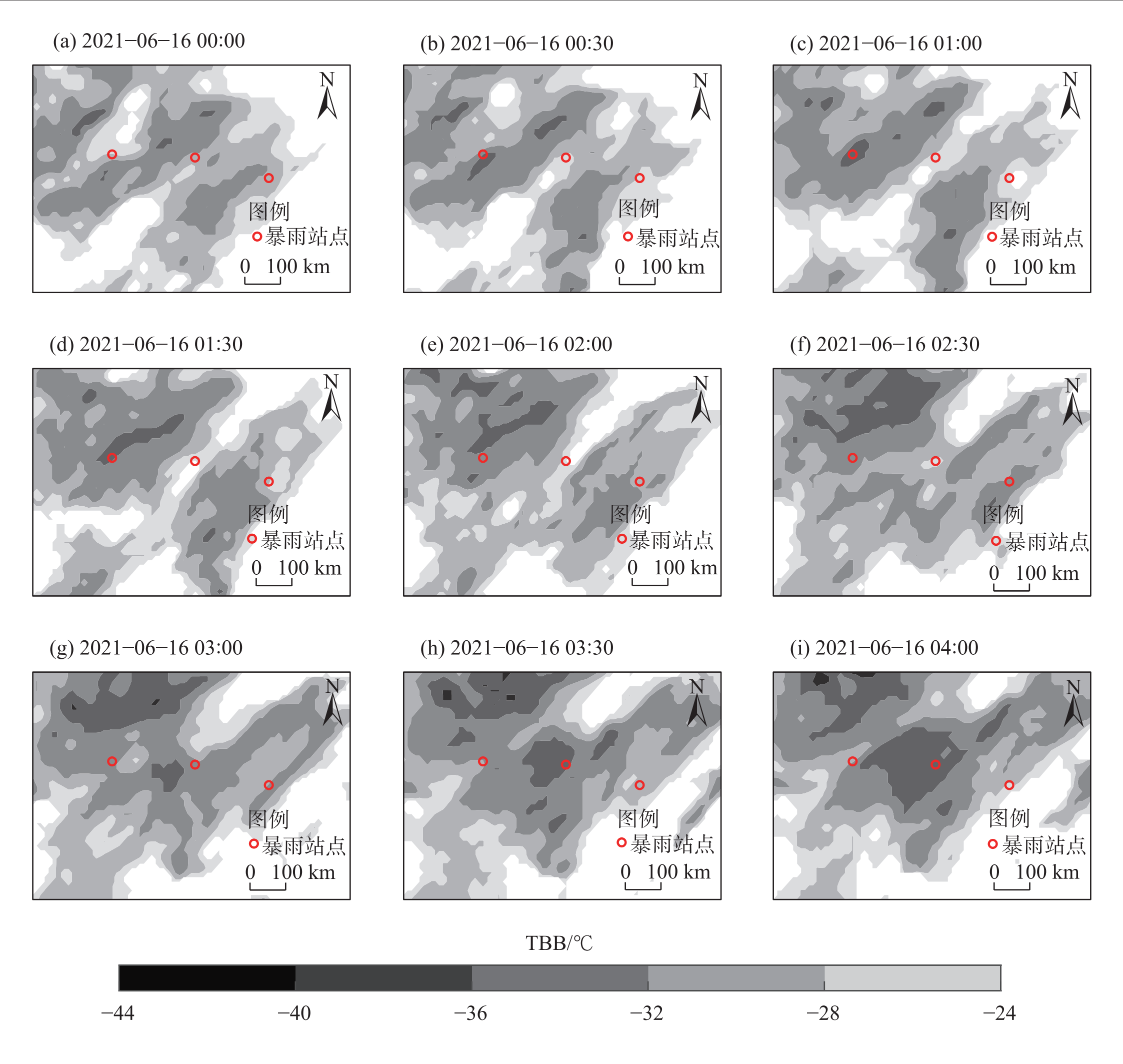


图8 2021年6月16日00:00至6月16日04:00 FY-2H卫星TBB逐30 min演变

Fig. 8 Evolution of the FY-2H satellite TBB over a 30-min period from 00:00 on June 16, 2021 to 04:00 on June 16, 2021

带内存在2个中心强度达-40 ℃的中-β尺度对流云团(图8a)。随后,对流云带内2个中-β尺度对流云团分裂后又合并加强发展,对流云带向西北方向移动,移过布琼村站(图8b~e)。同时,在洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站和兰干乡昆仑渠首站南侧存在强度为-36 ℃中-α尺度对流云团,云团不断向北延伸,冷云面积不断增大,并沿西北方向缓慢移动,在02:30与西侧的对流云带合并形成涡旋状对流云带覆盖在暴雨区上空(图8f)。此时,中亚低涡形成并维持在南疆西部,涡旋状对流云带形成与中亚低涡外围引导气流中。随后,对流云带内不断新生强度达-40 ℃的中-β尺度对流云团,且强度和尺度不断增大,维持在暴雨区上空(图8g~i)。受该对流云带和强的中尺度对流云团影响,3个站点都产生了较强的降水,值得注意的是,兰干乡昆仑渠首站在03:00和04:00发生短时强降水过程,此时该站点正好位于对流云团TBB梯度最大处,是该过程的直接影响系统。图9给出了2021年6月16日04:30至6月16日08:30 TBB逐30 min演变。从图中可以看到,在该时间段对流云带先是维持在暴雨区上空,随后不断北移移动至暴雨区北侧。对流云带内中-α尺度对流云团持续影响着暴雨区站点,随后对流云带的移动对流云团不断分裂后移出暴雨区。受其影响,3个站点持续产生降水,但强度有所减弱。最后,对流云团的不断北移移出暴雨区,洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站和兰干乡昆仑渠首站降水过程也趋于结束(图略)。由于布琼村站上空持续受对流云带外围影响,伴有持续性降水但强度较弱。

综上,本次昆仑山北坡和田地区3个累积降水量最大的站点发生的暴雨过程是由于不断有中尺度对流云团在暴雨区附近生成发展,并且移动至暴

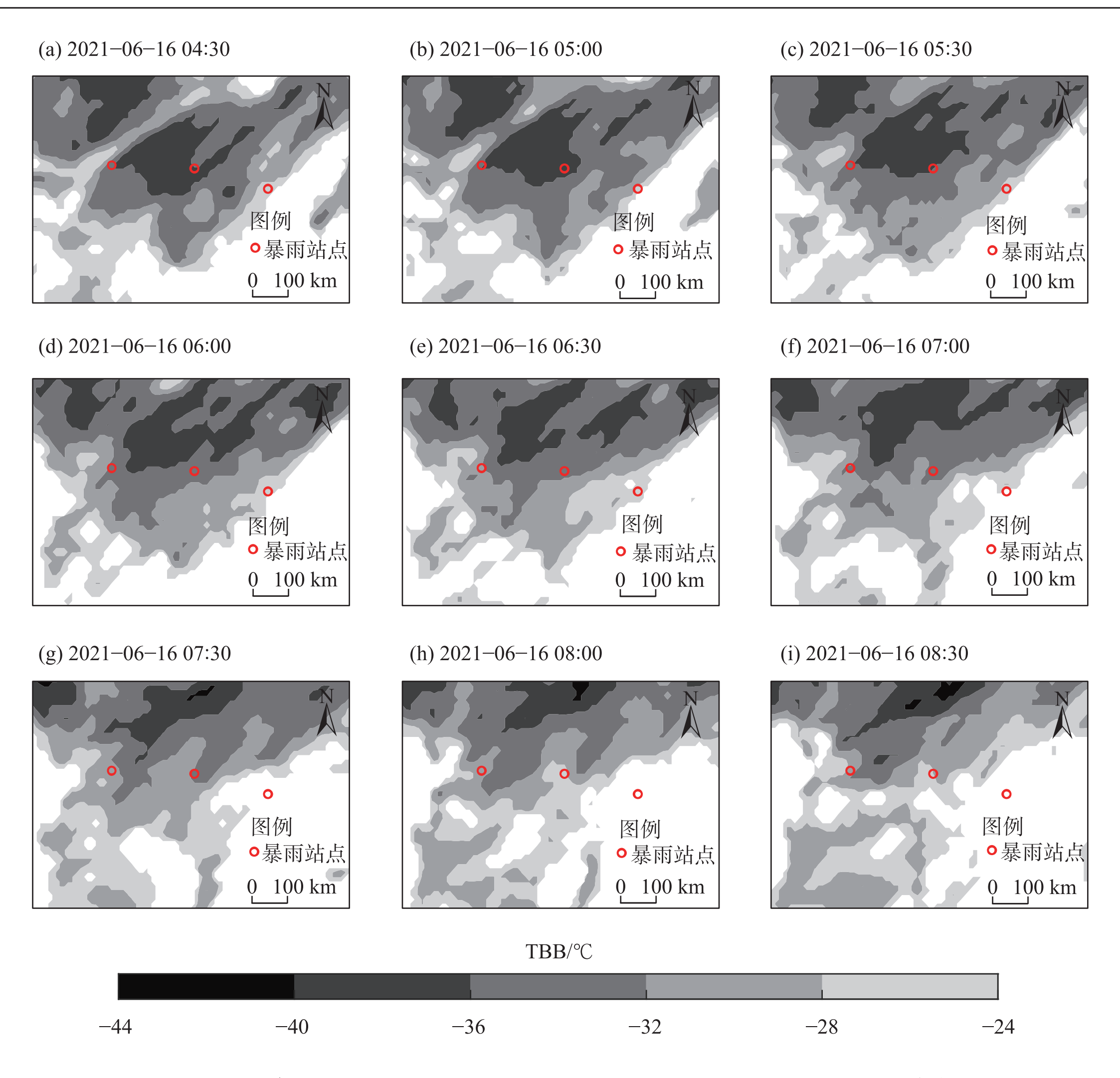


图9 2021年6月16日04:30至6月16日08:30 FY-2H卫星TBB逐30 min演变

Fig. 9 Evolution of the FY-2H satellite TBB over a 30-min period from 04:30 on June 16, 2021 to 08:30 on June 16, 2021

雨区加强维持，进而触发暴雨区强对流过程。影响本次暴雨过程的中尺度对流云团主要有中-β和中-α尺度对流云团，也有呈带状分布和涡旋状分布的中尺度对流云带。在本次降水过程中，降水区域出现在TBB梯度最大处，短时强降水发生时间与对流云团成熟时间和最低TBB出现时间一致。刘雯等[28]统计结果显示南疆地区活动频繁的中尺度对流云团平均持续时间为3~4 h，成熟时平均最低TBB为-41~47 ℃。对比本次暴雨过程，造成短时强降水的对流云团持续时间更短，最低TBB为-40 ℃，高于平均值，说明本次极端暴雨过程中对流伸展高度并不高。

3 结 论

(1) 本次极端暴雨过程，累积降水量大、暴雨站数多、局地性强并且极端性强。经统计，最大降雨中心为和田地区洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站，累积降水量121.6 mm，其次是布琼村站(107.8 mm)和兰干乡昆仑渠首站(102.1 mm)。其中，洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站和兰干乡昆仑渠首站发生短时强降水，而布琼村站降水强度小但持续时间长。

(2) 本次极端暴雨过程发生在“两脊一槽”的有利环流背景下，高空南亚高压呈双体型，伴随中亚低涡生成发展是本次过程的关键影响系统。暴雨区位于200 hPa西南急流入口区右侧，与低空急流共同作用，使得高层强辐散、低层辐合促进大气垂直运动发展，为触发暴雨发生提供了有利动力条件。500 hPa偏南气流、700 hPa切变线以及850 hPa偏东气流相互配合提供有利动力配置，并且利于暴雨区的水汽输送和聚集，促使本次昆仑山北坡极端暴雨过程的发生发展。

（3）中低层水汽通量输送、水汽通量散度和局地PWV变化结果显示，3个强降水中心站点在暴雨发生前由于受到中纬度低槽和高原系统的影响，存在持续的槽前偏西南、高原西侧偏南的持续水汽输送，并且在站点附近存在强的水汽通量辐合中心，使得站点的PWV在短时强降水前和连续性降水过程中短时间内出现显著增湿。进一步对比发现，发生短时强降水的洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站和兰干乡昆仑渠首站的PWV在强降水发生后显著减小，伴随降水过程的结束，而发生持续性降水的布琼村站在降水发生后PWV减幅较小，意味着有持续的水汽聚集，使得该站点降水过程持续时间最长。因此，我们认为PWV对极端暴雨的监测有较好的指示意义。对比水汽输送路径发现，布琼村站和兰干乡昆仑渠首站对流层中层（500 hPa）水汽输送路径主要以西南路径为主，洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站则以西南转向+南方路径为主。低层（850 hPa）都主要以低空偏东急流携带水汽输送为主。中低层水汽输送路径形成耦合，促进极端暴雨的发展加强。

（4）使用FY-2H逐30 min TBB资料分析本次暴雨过程中对流云团活动特征，结果显示在暴雨区附近持续有中尺度对流云团生成发展，并在暴雨区加强维持，是触发极端暴雨发生的直接影响系统。本次暴雨过程主要有中-β和中-α尺度对流云团，也有呈带状分布和涡旋状分布的中尺度对流云带。洛浦县山普鲁乡泥石流频发区1号站的短时强降水主要由西北-东南向列车效应型+合并加强型中尺度对流云团不断在其上空生成发展并移过此站点导致，站点位于对流云团TBB梯度最大处。布琼村站上空附近持续受到中尺度对流云团影响以及涡旋状中尺度对流云带持续覆盖，是导致其发生持续性降水的关键系统。涡旋状对流云带是导致兰干乡昆仑渠首站短时强降水发生的关键，站点位于云系边缘TBB梯度最大处，持续时间达4 h。与前人研究对比发现，本次极端暴雨过程中的中尺度对流云团持续时间较短，TBB高于统计值。

本文仅基于观测资料、风云卫星资料和再分析资料对本次极端暴雨过程做中尺度特征分析，未来将使用更多卫星产品和数值模拟等深入探讨触发暴雨的中尺度系统特征以及中尺度对流触发机制研究工作，进而为提高昆仑山北坡地区降水监测预警提供参考。

参考文献（References）

[1] 张俊兰, 杨霞, 施俊杰. 青藏高原天气系统对昆仑山北坡一次罕见暴雨过程影响分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1002-1011. [Zhang Junlan, Yang Xia, Shi Junjie. Analysis of the influence of the Qinghai-Xizang Plateau weather system on a rare rainstorm process on the northern slope of Kunlun Mountain[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1002-1011.]

[2] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583. [Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 577-583.]

[3] 戴新刚, 任宜勇, 陈洪武. 近50年新疆温度降水配置演变及其尺度特征[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 1003-1010. [Dai Xingang, Ren Yiyong, Chen Hongwu. Multi-scale feature of climate and climate shift in Xinjiang over the past 50 years[J]. Acta Meteorology Science, 2007, 65(6): 1003-1010.]

[4] 谢泽明, 周玉淑, 杨莲梅. 新疆降水研究进展综述[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(3): 204-212. [Xie Zeming, Zhou Yushu, Yang Lianmei. Review of study on precipitation in Xinjiang[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(3): 204-212.]

[5] 李海花, 闵月, 李桉孛, 等. 昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 715-724. [Li Haihua, Min Yue, Li Anbei, et al. Comparative analysis of water vapor characteristics of two extreme rainstorms in the north slope of Kunlun Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 715-724.]

[6] 戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征[J]. 自然科学进展, 2006, 16(12): 1651-1656. [Dai Xingang, Li Weijing, Ma Zhuguo. Characteristics of water vapor sources in Xinjiang in the last decade[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16 (12): 1651-1656.]

[7] 杨涛, 杨莲梅. 新疆强对流暴雨的气候特征和概率分布模式研究[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 47-52. [Yang Tao, Yang Lianmei. A research on climatic characteristics and probability distribution model of severe convective rainstorm in Xinjiang[J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(1): 47-52.]

[8] 杨莲梅, 张云惠, 秦贺. 中亚低涡研究若干进展及问题[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(5): 1-8. [Yang Lianmei, Zhang Yunhui, Qin He. Some advances and problems of Middle-Asia vortex[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(5): 1-8.]

[9] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 基于WRF模式的新疆巴音布鲁克盆地强降雨天气数值模拟效果分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 28-37. [Liu Yang, Li Chenzhi, Liu Zhihui, et al. Analysis on the numerical simulation of heavy rainfall based on WRF model in Bayanbuluk Basin[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 28-37.]

[10] 曾勇, 杨莲梅. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 475-484. [Zeng Yong, Yang Lianmei. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang[J].

Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 475-484.]

[11] 曾勇, 杨莲梅. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(5): 410-421. [Zeng Yong, Yang Lianmei. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-time precipitation events in the west of southern Xinjiang[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(5): 410-421.]

[12] 张云惠, 陈春艳, 杨莲梅, 等. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 191-200. [Zhang Yunhui, Chen Chunyan, Yang Lianmei, et al. Cause analysis on rare rainstrom in west of southern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 191-200.]

[13] 胡素琴, 希热娜依·铁里瓦尔地, 李娜, 等. 南疆西部干旱区两次极端暴雨过程对比分析[J]. 大气科学, 2022, 46(5): 1177-1197. [Hu Suqin, Tiliwaldi Xerinay, Li Na, et al. Comparative analysis of two extreme rainstorms in the arid area of western south Xinjiang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(5): 1177-1197.]

[14] 杨涛, 杨莲梅, 张云惠, 等. 新疆短时强降水天气系统环流配置及雷达回波特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 631-640. [Yang Tao, Yang Lianmei, Zhang Yunhui, et al. Circulation configuration of synoptic system and radar echo characteristics of short-time heavy rainfall in Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39 (4): 631-640.]

[15] 张俊兰, 李伟, 郑育琳. 昆仑山北坡短时强降水天气分型及雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(1): 1-9. [Zhang Junlan, Li Wei, Zheng Yulin. Weather classification and radar echo characteristics of short-term heavy precipitation in the northern Kunlun Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16 (1): 1-9.]

[16] 庄晓翠, 赵江伟, 李博渊, 等. 南疆西部暴雨过程水汽来源及输送特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(5): 544-555. [Zhuang Xiaocui, Zhao Jiangwei, Li Boyuan, et al. Characteristics of water vapor source and transport during rainstorm in western southern Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters, 2022, 41(5): 544-555.]

[17] 黄艳, 刘涛, 张云惠. 2010年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 615-622. [Huang Yan, Liu Tao, Zhang Yunhui. Spatial-temporal variation of seasonal and annual temperature during 1961—2010 in Urumqi area based on DEM[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4): 615-622.]

[18] 李建刚, 姜彩莲, 张云惠, 等. 中亚低涡背景下一次短时强降水过程MCS成因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 724-734. [Li Jiangang, Jiang Cailian, Zhang Yunhui, et al. Causal analysis of MCS in a short time severe precipitation process under the background of Central Asia vortex[J]. Arid Land Geography, 2019, 42 (4): 724-734.]

[19] 曾勇, 杨莲梅. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1220-1232. [Zeng Yong, Yang Lianmei. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1220-1232.]

[20] 庄晓翠, 张云惠, 周雪英, 等. 新疆短时强降水天气雷达回波特征[J]. 气象, 2021, 47(11): 1402-1415. [Zhuang Xiaocui, Zhang Yunhui, Zhou Xueying, et al. Radar echo characteristics of short-time severe precipitation in Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(11): 1402-1415.]

[21] 张之贤, 张强, 陶际春. 边界层对青藏高原东北边坡地区一次冰雹天气影响的数值诊断分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 321-328. [Zhang Zhixian, Zhang Qiang, Tao Jichun. Diagnostic analysis of the effect of planet boundary layer on a hail event in the northeastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 321-328.]

[22] 张强, 王蓉, 岳平, 等. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J]. 气象学报, 2017, 75(1): 39-56. [Zhang Qiang, Wang Rong, Yue Ping, et al. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(1): 39-56.]

[23] 刘维成, 张强, 刘新伟. 陆-气相互作用对大气对流活动影响研究进展和展望[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1278-1293. [Liu Weicheng, Zhang Qiang, Liu Xinwei. The impact of land-atmosphere interaction on the initiation and development of convective activities: A review[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(6): 1278-1293.]

[24] 刘晶, 刘兆旭, 周雅蔓, 等. 中昆仑山北坡持续性暴雨水汽输送及大气三维结构特征分析[J]. 大气科学, 2024, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22097. [Liu Jing, Liu Zhaoxu, Zhou Yaman, et al. The characterization of water vapor transport and three dimensional atmospheric structure during a persistent precipition event in northern slope of the middle Kunlun Mountains[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22097.]

[25] 肖开提·多莱特. 新疆降水量级标准的划分[J]. 沙漠与绿洲气象, 2005, 28(3): 7-8. [Duolaite Xiaokaiti. Formulation of precipitation intensity standard of Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2005, 28(3): 7-8.]

[26] 张俊兰, 李如琦, 李娜, 等. 新疆塔里木盆地2021年“7·19”暴雨水汽特征的初步分析[J]. 大气科学, 2023, 47(2): 567-584. [Zhang Junlan, Li Ruqi, Li Na, et al. Preliminary analysis of the water vapor characteristics of the “July 19” heavy rain in 2021 in the Tarim Basin, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(2): 567-584.]

[27] 杨莲梅, 杨涛. 阿克苏北部绿洲强对流暴雨与冰雹对比分析[J]. 干旱气象, 2004, 22(2): 11-16. [Yang Lianmei, Yang Tao. Comparative analysis of severe convective rainstorm and hail in north oasis of Akesu[J]. Journal of Arid Meteorology, 2004, 22(2): 11-16.]

[28] 郑永光, 朱佩君, 陈敏, 等. 1993—1996黄海及其周边地区M_αCS的普查分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40 (1): 66-72. [Zheng Yongguang, Zhu Peijun, Chen Min, et al. Meso-A-scale convective systems over Yellow Sea region during summers of 1993—1996[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitais

Pekinensis, 2004, 40(1): 66−72.]

[29] Li J, Yang L, Liu W, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of mesoscale convective systems producing short-duration heavy rainfall over the Tianshan Mountain area[J]. Advances in Meteorology, 2019, 2019: 9090659, doi: 10.1155/2019/9090659.

[30] 刘雯, 李建刚, 杨莲梅. 2016年夏末南疆地区中尺度对流系统(MCS)活动特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(4): 9−16. [Liu Wen, Li Jiangang, Yang Lianmei. Characteristics of the MCS over southern Xinjiang during the late summer of 2016[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(4): 9−16.]

Mesoscale convective systems characteristic analysis of the "6·14" extreme rainstorm in northern slope of the Kunlun Mountains

LI Xiaomeng[1,2,3,4], YANG Lianmei[1,2,3,4], LI Jiangang[1,2,3,4], LIU Jing[1,2,3,4]

(1. Urumqi Desert Meteorology Institute, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Innovation Institute of Cloud Water Resource Development and Utilization, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
4. Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Xinyuan 844900, Xinjiang, China)

Abstract: In this paper, we use meteorological observations with high temporal and spatial variability [Fengyun satellite data (FY−2H), GPS/Met atmospheric precipitable water volume (PWV) data, and ERA5 reanalysis data] to characterize the large-scale circulation background field and mesoscale convective system (MCS) of an extreme rainstorm process on the northern slope of the Kunlun Mountains from June 14 to 17, 2021. The results showed the following. (1) The rainstorm process was characterized by many rainstorm stations and large cumulative precipitation, both localized and extreme. There were three extreme rainstorm centers in the Hotan Prefecture, where short-term heavy precipitation and continuous precipitation occurred, respectively. The duration of the short-term heavy precipitation process was short, with a maximum hourly rainfall of 29.4 mm. Meanwhile, the duration of continuous precipitation was 3 days, with an hourly rainfall of less than 5 mm. The upper troposphere was maintained by a two-body South Asian high pressure, and the formation and development of the Central Asian low vortex was a favorable circulation background for the occurrence of this extreme rainstorm. Under the joint action of high- and low-altitude rapids, strong dispersion in the upper level and convergence in the lower level promoted the development of vertical movement of the atmosphere. Moreover, a 500-hPa southerly flow, a 700-hPa shear line, and an 850-hPa easterly flow jointly provide a favorable power configuration for the rainstorm. (2) The water vapor transport in the middle troposphere was dominated by a southwest path and a southwest+south path, whereas that in the lower layer was dominated by a low-level easterly jet stream. The coupling of the water vapor transport paths in the middle and lower layers promoted the development and strengthening of this extreme rainstorm. The continuous moisture transport and strong water vapor flux convergence center before the occurrence of the extreme rainstorm made the atmospheric PWV in the rainstorm area show a significant humidification and gathering process before the precipitation, with the PWV reaching 30 mm. (3) Train-effect-type + merging- and intensifying-type MCSs were continuously generated over the rainstorm station and moved through, attributed to the direct influence system triggering short-term heavy precipitation, and the station was located at the maximum of the TBB gradient of the MCSs. The development and maintenance of meso-β- and meso-α-scale MCSs and the continuous coverage of vortex-like mesoscale convective cloud bands were the key systems that led to the occurrence of persistent precipitation at the storm site.

Key words: extreme rainstorms; Central Asian low vortex; water vapour transport; mesoscale convective system; northern slope of the Kunlun Mountains